

МЕТОДИКА ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

проф. В.Е. Пустоваров, к.т.н. Ю.А. Ясинский, Т.А. Писаренко

В статье рассмотрены особенности применения методики выбора параметров профилактических испытаний изоляции электрооборудования с учетом эксплуатационных воздействий.

Постановка проблемы. Существующие методы не учитывают эксплуатационные воздействия на изоляцию, а это существенно снижает их эффективность.

Анализ публикаций. Параметры испытаний задаются фиксировано для различных видов электрооборудования на весь период их эксплуатации. Это не дает возможности учитывать старение изоляции в процессе эксплуатации [1 – 4].

Цель статьи – изложить методику выбора параметров профилактических испытаний изоляции электрооборудования с учетом эксплуатационных воздействий.

Методика позволяет рассчитывать и выбирать параметры профилактических испытаний изоляции высоковольтного электрооборудования повышенным напряжением частоты 50 Гц с учетом конкретных условий эксплуатации и текущего состояния изоляции, а это позволяет оптимизировать параметры испытаний и повысить их эффективность.

Достоинством предлагаемой методики является возможность учета взаимосвязи параметров испытаний и степени их влияния на электрическую прочность изоляции. Это становится ясным при анализе следующих соотношений:

$$U_{т.п} \leq U_{исп1} - \Delta U_{пр1} \cdot T_{исп.о.е}; \quad (1)$$

$$\Delta U_{пр.i} \leq U_{исп.i} - U_{т.п}, \quad (2)$$

где $U_{т.п}$ – максимально допустимый уровень перенапряжений, кВ; $U_{исп1}$, $U_{исп.i}$ – величина испытательного напряжения соответственно при первом и i -том испытаниях, кВ; $\Delta U_{пр1}$, $\Delta U_{пр.i}$ – снижение электрической прочности изоляции за период времени соответственно до первого испытания и между двумя соседними испытаниями, кВ; $T_{исп.о.е}$ – период

времени между соседними испытаниями, относительные единицы. Из выражения (1) видно, что эксплуатационная надежность изоляции может быть повышена за счет увеличения испытательного напряжения, либо путем уменьшения периода времени между испытаниями $T_{\text{исп.о.е.}}$. Когда $\Delta U_{\text{пр.}i}$ велико и повышение $U_{\text{исп.}i}$ связано с опасностью повреждения изоляции, надо уменьшать период времени $T_{\text{исп.о.е.}}$. Снижение величин $U_{\text{исп.}i}$ и $T_{\text{исп.о.е.}}$ уменьшает эффективность испытаний, однако этот недостаток можно устранить за счет правильного выбора числа испытаний $n_{\text{исп.}}$. Испытания будут считаться эффективными, если в промежутке между двумя соседними испытаниями уменьшение электрической прочности $\Delta U_{\text{пр.}i}$ не превысило разность между испытательным напряжением $U_{\text{исп.}i}$ и нормированным уровнем перенапряжений $U_{\text{т.п}}$ в соответствии с выражением (2).

Методика может быть использована при подготовке и проведении профилактических испытаний электрооборудования на напряжение 6 ... 10 кВ, используемого на промышленных предприятиях.

На основании выражений (1) и (2) ниже выводятся расчетные соотношения для определения параметров профилактических испытаний. При этом учитывается соотношение между величиной пробивного напряжения $U_{\text{пр}}$ и сроком службы изоляции $T_{\text{сл}}$:

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{пр}0} - V_e \cdot \ln T_{\text{сл}}, \quad (3)$$

где V_e – коэффициент, определяющий скорость спада пробивного напряжения; $U_{\text{пр}0}$ – начальное пробивное напряжение изоляции при вводе в эксплуатацию.

К параметрам профилактических испытаний изоляции относятся:

- величина испытательного напряжения $U_{\text{исп.}i}$;
- время испытания $t_{\text{исп.}}$;
- период времени между испытаниями $T_{\text{исп.о.е.}}$;
- число испытаний изоляции $n_{\text{исп}}$ за весь срок службы электрооборудования.

Основные требования к профилактическим испытаниям изоляции (выявление всех развитых опасных дефектов в изоляции, неповреждаемость бездефектной части изоляции при испытаниях, учет воздействия эксплуатационных перенапряжений на изоляцию) могут быть полностью удовлетворены при правильном расчете параметров испытаний.

Для проведения количественных оценок характеристика (1) строится в полулогарифмическом масштабе по двум точкам, имеющим координаты (U_1, t_1) и (U_2, t_2) . В этом случае характеристика (3) представляет-

ся прямой линией. Первая точка характеризует электрическую прочность изоляции в первый момент после ввода ее в эксплуатацию. Координаты первой точки будут: $U_1 = U_{\text{пр}0}$, $t_1 = 1$ с. Вторая точка характеризует электрическую прочность $U_{\text{ор}}$ изоляции в момент ее аварийного выхода из строя. Координаты второй точки будут: $U_2 = U_{\text{ор}}$, $t_2 = T_{\text{сл.нрм}}$.

Запишем выражение (3) с учетом координат обеих точек:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_{\text{пр}0} - B_e \cdot \ln t_1; \\ U_2 &= U_{\text{пр}0} - B_e \cdot \ln t_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Сложим выражения, а затем вычтем одно из другого. После несложных преобразований получим значения B_e и $U_{\text{пр}0}$:

$$\begin{aligned} B_e &= \frac{U_1 - U_2}{\ln(t_2/t_1)}; \\ U_{\text{пр}0} &= \frac{U_1 + U_2}{2} + \frac{(U_1 - U_2)}{2} \cdot \frac{\ln(t_1 \cdot t_2)}{\ln(t_2/t_1)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставив значения $U_{\text{пр}0}$ и B_e в исходное выражение (3), получим зависимость напряжения от срока службы изоляции, по которому можно определить величину испытательного напряжения $U_{\text{исп.}i}$ для любого значения $T_{\text{исп.}i}$:

$$U_{\text{исп.}i} = \frac{U_{\text{пр}0} + U_{\text{ор}}}{2} \left[1 + \frac{\ln(t_1 \cdot T_{\text{сл.нрм}})}{\ln(T_{\text{сл.нрм}}/t_1)} \right] - \frac{(U_{\text{пр}0} - U_{\text{ор}}) \cdot \ln T_{\text{сл.нрм}}}{\ln(T_{\text{сл.нрм}}/t_1)}.$$

Для определения максимального по длительности периода между двумя соседними испытаниями можно использовать зависимость пробивного напряжения изоляции от величины напряжения и времени его приложения

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{пр}0} \left(\frac{U_{\text{пр}0}}{U} \right)^{-t/T_{\text{сл}}} \quad (7)$$

Из выражения (7) можно получить значение периода времени $T_{\text{макс}}$, если учесть следующее. Первое испытание, проведенное в момент времени $T_{\text{сл.нрм}} - T_1$, будет эффективным (без пробоя изоляции), если значение пробивного напряжения $U_{\text{пр}}$ в этот момент превосходит испытательное напряжение $U_{\text{исп.}1}$. В момент времени $T_{\text{сл.нрм}} - T_2$ (второе испытание) пробивное напряжение должно быть больше уровня перенапряжений $U_{\text{т.п}}$, от которого изоляция не защищена. Тогда для первого и второго испытаний можно записать соответственно:

$$U_{\text{исп.1}} = U_{\text{пр0}} \left(\frac{U_{\text{пр0}}}{U_{\text{ор}}} \right)^{-\frac{T_{\text{сл.нрм}} - T_1}{T_{\text{сл.нрм}}}}; \quad U_{\text{исп.2}} = U_{\text{пр0}} \left(\frac{U_{\text{пр0}}}{U_{\text{ор}}} \right)^{-\frac{T_{\text{сл.нрм}} - T_2}{T_{\text{сл.нрм}}}}. \quad (8)$$

причем $T_{\text{макс}} = T_2 - T_1$.

Прологарифмировав выражение (8), можно определить периоды времени T_1 и T_2 , а следовательно и $T_{\text{макс}}$:

$$T_1 = T_{\text{сл.нрм}} \left[\ln \left(\frac{U_{\text{исп.1}}}{U_{\text{ор}}} \right) : \ln \left(\frac{U_{\text{пр0}}}{U_{\text{ор}}} \right) \right]; \quad (9)$$

$$T_2 = T_{\text{сл.нрм}} \left[\ln \left(\frac{U_{\text{исп.2}}}{U_{\text{ор}}} \right) : \ln \left(\frac{U_{\text{пр0}}}{U_{\text{ор}}} \right) \right]. \quad (10)$$

Тогда

$$T_{\text{макс}} = T_{\text{сл.нрм}} \left[\ln \left(\frac{U_{\text{исп.1}}}{U_{\text{исп.2}}} \right) : \ln \left(\frac{U_{\text{пр0}}}{U_{\text{ор}}} \right) \right]. \quad (11)$$

Время старения изоляции при воздействии испытательного напряжения t_x определится следующим образом. Часть полного срока службы изоляции $T_{\text{сл.нрм}}$, эквивалентного старению при воздействии напряжения $U_{\text{исп}}$, определится из соотношения $t_{\text{исп}} : T_{\text{исп}} = t_x \cdot T_{\text{сл.нрм}}$, если принять, что испытательному напряжению $U_{\text{исп}}$ соответствует срок службы $T_{\text{исп}}$, а рабочему напряжению $U_{\text{ор}} - T_{\text{сл.нрм}}$. Тогда время t_x будет равно:

$$t_x = (t_{\text{исп}} \cdot T_{\text{сл.нрм}}) : T_{\text{исп}}. \quad (12)$$

Используя выражение (3), можно для времени t_x записать:

$$t_x = t_{\text{исп}} \left[\exp \left(\frac{U_{\text{ор}} - U_{\text{пр0}}}{V_e} \right) : \exp \left(\frac{U_{\text{исп}} - U_{\text{пр0}}}{V_e} \right) \right] = t_{\text{исп}} \cdot \exp \left(\frac{U_{\text{исп}} - U_{\text{ор}}}{V_e} \right). \quad (13)$$

Учитывая, что величина V_e в данном случае практически постоянна, для второй точки характеристики (3) с координатами $(U_{\text{ор}}; T_{\text{сл.нрм}})$ скорость V_e можно определить:

$$V_{e_x} = (U_{\text{пр0}} - U_{\text{ор}}) / \ln T_{\text{сл.нрм}}. \quad (14)$$

Подставив значение V_e в выражение (12), получим для времени t_x :

$$t_x = t_{\text{исп}} \cdot \exp \left[\frac{(U_{\text{исп}} - U_{\text{ор}}) \cdot \ln T_{\text{сл.нрм}}}{(U_{\text{пр0}} - U_{\text{ор}})} \right]. \quad (14)$$

Выводы. 1. Полученные выражения позволяют определить параметры профилактических испытаний изоляции электрооборудования.

2. В качестве таких параметров целесообразно учитывать срок службы, время испытаний и величину испытательного напряжения.

3. Чем больше величина испытательного напряжения и длительность его воздействия, тем большая часть срока службы изоляции будет определяться проведенными профилактическими испытаниями.

4. Нижний предел величины испытательного напряжения должен выбираться с учетом значений установившихся внутренних перенапряжений, имеющих место в конкретной схеме электрической сети. Например, для сетей 6 ... 10 кВ эта величина составит $(1,5 - 2) U_{ном}$.

5. Верхний предел величины испытательного напряжения целесообразно выбирать с учетом уровней пробивного напряжения изоляции электрооборудования – величина испытательного напряжения должна быть на 30 – 40% ниже величины пробивного напряжения изоляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулаковский В.Б. *Профилактические испытания и дефекты изоляции крупных электрических машин*. 2-е изд. – М.: Энергия, 1970. – 184 с.
2. Глазков Ю.А., Ясинский Ю.А. *Высокочастотный импульсный метод профилактических испытаний изоляции статорных обмоток электрических машин // В сб.: Вопросы старения изоляции крупных электрических машин и способы её профилактического обслуживания*. – М.: Союзтехэнерго, 1979. – С. 170 – 172.
3. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. *Надежность электрических машин*. – Л.: Энергия, 1976. – 248 с.
4. *Внутренние перенапряжения в электрических сетях высокого напряжения переменного тока. Итоги науки и техники*. – М.: АН СССР, 1964. – 242 с.

Поступила 7.09.2004

ПУСТОВАРОВ Владимир Евгеньевич, канд. техн. наук, профессор, профессор УИПА. В 1961 году окончил Харьковское высшее авиационно-инженерное военное училище. Область научных интересов – радиоэлектроника и электроэнергетика.

ЯСИНСКИЙ Юрий Афанасьевич, канд. техн. наук, доцент УИПА. В 1964 году окончил ХПИ им. В.И. Ленина. Область научных интересов – высоковольтные испытания изоляции электрооборудования.

ПИСАРЕНКО Татьяна Александровна, аспирант Украинской инженерно-педагогической академии. В 2002 году закончила магистратуру УИПА. Область научных интересов – электроэнергетика, вопросы надежности оборудования.